

DISPOSITIF DE REINITIALISATION D'UN DISPOSITIF DE BIT QUANTIQUE A DEUX ETATS D'ENERGIE

Domaine Technique

5 La présente invention a pour objet un dispositif de réinitialisation d'un dispositif de bit quantique présentant deux états  $|0\rangle$  et  $|1\rangle$  associés respectivement à deux niveaux d'énergie  $E_0$  et  $E_1$  tels que  $E_0 < E_1$ , pour réinitialiser ce dispositif de bit quantique à l'état  $|0\rangle$ .

10 Les dispositifs de bit quantique (dénommés dans ce qui suit Qubits) peuvent avoir de très nombreux supports physiques : atomes ou ions contrôlés optiquement ou électromagnétiquement, photons polarisés, spins nucléaires contrôlés électromagnétiquement, dispositifs électroniques intégrés notamment supraconducteurs à jonctions Josephson, ou semiconducteurs à gaz d'électrons bidimensionnels, etc.

15 Indépendamment de ces supports physiques, un Qubit constitue toujours un système à deux états distinct notés ici  $|0\rangle$  et  $|1\rangle$ . Ces deux états de base correspondent, dans la majorité des cas, à deux niveaux d'énergie différents, et dans de rares cas (photons polarisés par exemple) à deux états non fondés sur des niveaux d'énergies différents.

20 L'invention s'applique à tous Qubits dont les états de base correspondent à deux niveaux d'énergies différents. Sans perte de généralité, on associera dans ce qui suit l'état  $|0\rangle$  au niveau d'énergie le plus bas, noté  $E_0$ , et l'état  $|1\rangle$  au niveau d'énergie le plus haut, noté  $E_1$ . L'état  $|0\rangle$  est aussi appelé ici état fondamental.

25  
Etat de l'art

Dans un Qubit, une information doit pouvoir être inscrite, conservée ou modifiée de manière contrôlée par couplage ou non à d'autres Qubits, puis lue. L'inscription est la préparation du Qubit dans une superposition cohérente quelconque  $a|0\rangle + b|1\rangle$  de ses deux états de base, expression dans laquelle «  $a$  » et «  $b$  » sont des nombres complexes

appelés amplitudes de probabilité. Le contrôle cohérent de l'état quantique du Qubit est le contrôle de l'évolution au cours du temps des amplitudes de probabilités « a » et « b ».

5 La perte de contrôle de ces amplitudes de probabilité peut avoir lieu de deux manières :

10 La première est la dépolarisation, c'est-à-dire l'augmentation incontrôlée du module de l'une des amplitudes de probabilité au profit du module de l'autre. Suivant que le module de l'amplitude « a » du niveau fondamental augmente ou diminue, la dépolarisation est une excitation ou une relaxation de l'énergie du Qubit. La relaxation de l'énergie est un processus intrinsèquement aléatoire caractérisé par un temps caractéristique  $T_1$  appelé temps de relaxation. Ce temps de relaxation est défini comme le temps moyen qu'il faut pour que le Qubit préparé initialement dans l'état  $|1\rangle$  se retrouve dans l'état  $|0\rangle$ .

15 La seconde manière de perdre le contrôle des amplitudes de probabilités correspond à l'apparition d'un déphasage aléatoire entre les états  $|0\rangle$  et  $|1\rangle$ . Autrement dit, pour un Qubit n'interagissant pas avec d'autres Qubits, l'évolution idéale qui s'exprime mathématiquement par  $a(t)|0\rangle + b(t)|1\rangle$  est en fait remplacée par une évolution partiellement 20 aléatoire du type  $a(t)|0\rangle + b(t)e^{i\phi(t)}|1\rangle$  où  $\phi(t)$  est une phase aléatoire.

Vis-à-vis de ces deux phénomènes possibles, le Qubit doit conserver une évolution cohérente le plus longtemps possible.

25 Avant toute opération d'inscription sur un Qubit, il est nécessaire de le placer dans un état de référence qui est généralement son état fondamental  $|0\rangle$ . Selon l'état actuel de la technique, cette opération de réinitialisation s'effectue en attendant simplement, durant un laps de temps égal à quelques fois le temps de relaxation  $T_1$ , que le Qubit relaxe vers l'état  $|0\rangle$  avec une très grande probabilité.

30 Une telle réinitialisation peut s'avérer très lente dans la mesure où le fonctionnement même d'un Qubit exige de maintenir le plus longtemps possible sa cohérence quantique, et donc d'avoir un temps de relaxation  $T_1$  le plus long possible. Autrement dit, plus un Qubit est performant, plus

le temps de relaxation  $T_1$  est long et plus sa réinitialisation devient longue.

### Exposé de l'invention

L'invention vise précisément à résoudre ce problème de lenteur de la réinitialisation, et à permettre à un Qubit performant d'être réinitialisé 5 rapidement, sans dégradation significative de son aptitude à évoluer de manière cohérente.

Ces buts sont atteints conformément à l'invention grâce à un dispositif de réinitialisation d'un dispositif de bit quantique ou Qubit présentant deux états  $|0\rangle$  et  $|1\rangle$  associés respectivement à deux niveaux 10 d'énergie  $E_0$  et  $E_1$  tels que  $E_0 < E_1$ , pour réinitialiser ce dispositif de bit quantique à l'état  $|0\rangle$ , caractérisé en ce qu'il comprend des premiers moyens aptes à générer une augmentation temporaire de la probabilité du dispositif de bit quantique de relaxer de l'état  $|1\rangle$  vers l'état  $|0\rangle$  et des 15 deuxièmes moyens aptes à absorber l'énergie de transition  $\Delta E_{01} = E_1 - E_0$  cédée par le dispositif de bit quantique lors de sa relaxation de l'état  $|1\rangle$  vers l'état  $|0\rangle$ .

On peut encore définir cette invention en disant que le Qubit à deux niveaux d'énergie peut être réinitialisé par une augmentation temporaire de sa probabilité de relaxation, obtenue pour tout ou pour partie par un 20 couplage temporaire à un dispositif dissipatif capable d'absorber son énergie de transition.

Enfin, on peut encore définir cette invention en disant que le Qubit à deux niveaux d'énergie peut être réinitialisé par un changement de sa fréquence de transition de manière à le coupler à un système présentant 25 au moins un degré de liberté dont la densité spectrale quantique à la fréquence de transition du Qubit est grande.

Avec un Qubit dont les deux états  $|0\rangle$  et  $|1\rangle$  correspondent respectivement à deux niveaux d'énergie  $E_0$  et  $E_1$  tels que  $E_0 < E_1$  un tel fonctionnement peut être réalisé à l'aide d'un dispositif de réinitialisation 30 selon l'invention tel que :

- les deuxièmes moyens sont placés dans l'environnement énergétique immédiat du dispositif de bit quantique et ont au moins un pic d'absorption dont la valeur  $\Delta E_{\text{env}}$  est :

- suffisamment éloignée de l'énergie de transition  $\Delta E_{01} = E_1 - E_0$  du dispositif de bit quantique, pour rendre négligeable ou nulle toute interaction entre le dispositif de bit quantique et ces deuxièmes moyens, mais
- suffisamment proche de cette énergie de transition pour que le dispositif de bit quantique puisse être placé dans des conditions de fonctionnement où l'énergie de transition  $\Delta E'_{01}$  devient égale à ou proche de la valeur  $\Delta E_{\text{env}}$  du pic d'absorption, de telle manière qu'il puisse exister temporairement un fort couplage d'énergie entre le dispositif de bit quantique et ces deuxièmes moyens, et

15 - les premiers moyens sont aptes à modifier l'énergie de transition  $\Delta E_{01} = E_1 - E_0$  du dispositif de bit quantique, pour l'amener, lors des réinitialisations, à ladite valeur  $\Delta E'_{01}$  égale à ou proche de la valeur  $\Delta E_{\text{env}}$  du pic d'absorption.

20 Les deuxièmes moyens ayant au moins un pic d'absorption de valeur  $\Delta E_{\text{env}}$  peuvent présenter un degré de liberté particulier d'énergie caractéristique  $\Delta E_{\text{env}}$  pouvant absorber l'énergie de transition  $\Delta E_{01} = E_1 - E_0$  du dispositif de bit quantique lorsque celle-ci est amenée à la valeur  $\Delta E'_{01}$  égale à ou proche de la valeur  $\Delta E_{\text{env}}$  du pic d'absorption.

25 Les deuxièmes moyens ayant au moins un pic d'absorption de valeur  $\Delta E_{\text{env}}$  peuvent aussi présenter une collection de degrés de liberté dont la densité spectrale quantique à la fréquence de transition  $\nu_{01} = \Delta E_{01}/h$  (où  $h$  est la constante de Planck) du dispositif de bit quantique est grande. Dans ce cas il existe une multiplicité de valeurs de  $\Delta E_{\text{env}}$  très proches.

Les premiers moyens de l'invention permettent soit de réduire à une valeur extrêmement faible le couplage du Qubit avec son environnement, afin de minimiser l'effet de décohérence de cet environnement, d'augmenter le temps de relaxation  $T_1$  à une valeur très grande et de 5 laisser évoluer le Qubit de manière cohérente, soit de coupler le Qubit avec son environnement, afin de maximiser la décohérence par relaxation, c'est-à-dire de diminuer le temps de relaxation  $T_1$  jusqu'à une valeur très faible, et de réinitialiser rapidement le Qubit dans l'état  $|0\rangle$ .

10 Selon un exemple particulier de réalisation, les premiers moyens comprennent des moyens générant des consignes spécifiques de réinitialisation, ces consignes étant appliquées aux moyens habituels de réglage du dispositif de bit quantique, de manière à amener temporairement l'énergie de transition  $\Delta E_{01}$  à la valeur  $\Delta E'_{01}$  égale à ou proche de la valeur  $\Delta E_{env}$  du pic d'absorption.

15 De façon plus particulière, les consignes spécifiques de réinitialisation peuvent alors avoir une valeur particulière choisie en dehors des plages utilisées lorsqu'on laisse évoluer le Qubit de manière cohérente, mais ceci n'est pas obligatoire.

20 Selon un autre exemple particulier de réalisation, les premiers moyens comprennent des moyens spécifiques de réglage des paramètres de fonctionnement du dispositif de bit quantique, agissant directement sur l'énergie de transition du dispositif de bit quantique pour amener temporairement l'énergie de transition  $\Delta E_{01}$  à une valeur  $\Delta E'_{01}$  égale à ou proche de la valeur  $\Delta E_{env}$  du pic d'absorption, indépendamment du 25 réglage des paramètres de fonctionnement du dispositif de bit quantique tels que choisis pour le faire évoluer de manière cohérente.

Seules les caractéristiques fondamentales d'un Qubit à deux niveaux d'énergie étant mises en oeuvre, l'invention est applicable à tout Qubit de ce type, quelle que soit sa technologie de réalisation.

30 Selon une première technologie préférentielle de réalisation ces

Qubits sont électriques, à jonctions supraconductrices Josephson. Leur évolution cohérente peut être assurée par construction en minimisant leur nombre de degrés de liberté, en conférant à ces Qubits certaines propriétés de symétrie décrites plus avant dans la suite de la présente 5 demande, et par ajustement des paramètres extérieurs contrôlant leur fréquence de transition.

L'invention s'applique en particulier au cas préférentiel où le Qubit électrique comprend un support physique ayant un comportement quantique constitué par un dispositif électronique intégré supraconducteur 10 réalisé à l'aide d'une boîte à paires de Cooper à deux jonctions Josephson munie d'un circuit d'écriture comportant une électrode de grille, d'un circuit de lecture comprenant une jonction Josephson de lecture, d'énergie Josephson sensiblement supérieure à celle des jonctions Josephson de la boîte de Cooper, et des moyens magnétiques aptes à ajuster la phase du 15 Qubit, conformément à l'article publié dans la revue Science 1069372 du 04 mai 2002 « Manipulating the Quantum State of an Electrical Circuit » de D. Vion, A. Aassime, A. Cottet, P. Joyez, H. Pothier, C. Urbina, D. Esteve, M. H. Devoret.

Un tel circuit, appelé Quantronium dans ce qui suit, est lu par 20 l'application d'une impulsion de courant apte à faire basculer la tension de la jonction Josephson de lecture.

La boucle supraconductrice d'un tel Qubit est construite de telle manière que sa fréquence de transition  $\nu_{01}$  puisse être ajustée à une valeur stationnaire vis-à-vis des paramètres et perturbations extérieurs, 25 condition que l'on recherche pour écrire une information dans le Qubit ou le laisser évoluer de manière cohérente. Cet ajustement est en pratique réalisé en générant à l'aide d'une boucle magnétique située à proximité un flux magnétique ajustable agissant sur la phase  $\delta$  du Qubit.

Le circuit de lecture, indépendant du circuit d'écriture, est 30 galvaniquement connecté à la boucle supraconductrice du Qubit. Il comporte, outre la jonction Josephson de lecture, d'une part des moyens

pour appliquer pendant la phase de lecture une impulsion de courant  $I_b$  de durée et d'amplitude paramétrables, et d'autre part des moyens de détection des sauts de phase de  $2\pi$  aux bornes de la jonction Josephson de lecture qui apparaissent, suite à l'impulsion de lecture, pour l'un des 5 deux états exclusivement.

Afin d'étudier comment varie la probabilité de relaxation du Qubit lors de l'application de cette impulsion de lecture, des mesures ont été conduites en générant des paliers temporels sur le front de montée de cette impulsion. On remarque que lorsque ce palier atteint certaines 10 valeurs de courant, dont chacune fixe une certaine énergie de transition du Qubit, la probabilité de relaxation de ce Qubit devient élevée (le temps de relaxation  $T_1$  devient petit). Ces valeurs correspondent à des résonances de l'environnement immédiat du Qubit, environnement qui est dans ce cas simplement le circuit électrique de lecture.

15 Pour ce Quantronium, la mise en oeuvre de l'invention peut présenter plusieurs modalités.

Les deuxièmes moyens du dispositif de réinitialisation selon l'invention comprennent un dispositif dissipatif qui est typiquement réalisé par un circuit résonnant pourvu d'un élément résistif. Plus précisément, il 20 peut être réalisé par l'introduction volontaire d'une résonance dans le circuit électrique de lecture du Qubit, dont la fréquence est éloignée de la valeur que prend la fréquence de transition du Qubit quand celle-ci est stationnaire vis-à-vis des paramètres de contrôle, mais peut être temporairement prise par la fréquence de transition du Qubit lors d'une 25 réinitialisation.

Les premiers moyens ou moyens de couplage peuvent comprendre un générateur de signaux de commande qui sont appliqués aux moyens de réglages propres au Qubit, par exemple :

30 - une impulsion de courant de valeur spécifique appliquée à la bobine magnétique (réalisation préférentielle des moyens magnétiques de réglage) agissant sur la phase  $\delta$  du Qubit.

- une valeur spécifique d'impulsion de courant appliquée au moyen de commande habituel que constitue le circuit de lecture.

De façon préférentielle, on choisira comme valeur du flux magnétique dans la boucle supraconductrice et/ou du courant dans la jonction de lecture, une (des) valeur(s) qui ne sont jamais prises lors du fonctionnement nominal. En ce qui concerne le courant dans la jonction de lecture, celui-ci pourra par exemple prendre durant la phase de réinitialisation une valeur de signe opposé au signe de l'impulsion de courant servant à la lecture de l'état du Qubit.

Plus généralement, tous les moyens permettant le réglage des paramètres agissant sur ce circuit sont susceptibles de constituer les moyens de réinitialisation, à condition qu'on leur applique des grandeurs d'entrée spécifiques.

Le fonctionnement est alors le suivant dans le cas d'une commande générant une impulsion de courant dans le circuit de lecture :

- lorsque l'on veut écrire une information dans le Qubit ou le laisser évoluer de manière cohérente, on règle le flux magnétique traversant la boucle supraconductrice du Qubit et le courant de la jonction de lecture de telle façon que la fréquence de transition du Qubit prenne sa valeur stationnaire.

- lorsque l'on veut réinitialiser le Qubit, on génère une impulsion de courant de lecture amenant temporairement la fréquence de transition du Qubit à la valeur égale à ou très proche de la valeur de la fréquence de la résonance volontairement introduite.

On voit que ce fonctionnement se transpose de manière évidente au cas d'une impulsion de courant dans la bobine agissant sur la phase  $\delta$  du Qubit.

Ces moyens de couplage peuvent être aussi des moyens spécifiques au dispositif de réinitialisation, comme par exemple des seconds moyens magnétiques (par exemple réalisés par une bobine

magnétique) agissant sur la phase  $\delta$  du Qubit, une deuxième grille de couplage de la boîte à paires de Cooper, une seconde boucle passant par la jonction Josephson de lecture et apte à envoyer une impulsion de courant d'une amplitude correspondant à une forte probabilité de 5 décohérence du Qubit, etc. Là encore, le fonctionnement se déduit avec évidence du cas précédent.

De façon préférentielle, on choisira comme valeur du flux magnétique dans la boucle supraconductrice et/ou du courant dans la jonction de lecture, une (des) valeur(s) qui ne sont jamais prises lors du 10 fonctionnement nominal. En ce qui concerne le courant dans la jonction de lecture, celui-ci pourra par exemple prendre durant la phase de réinitialisation une valeur de signe opposé au signe de l'impulsion de courant servant à la lecture de l'état du Qubit.

Selon une seconde technologie, les Qubits peuvent avoir pour 15 support physique un atome ou un ion, dont l'état énergétique change sous l'effet de l'absorption ou de l'émission d'un photon de fréquence  $\nu_{01}$  correspondant à l'énergie de transition du Qubit. Le maintien de la cohérence peut être assuré par exemple en plaçant cet atome (rsp. ion) dans une cavité électromagnétique suffisamment petite pour qu'elle ne 20 puisse absorber aucun photon à la fréquence  $\nu_{01}$ . Le dispositif de réinitialisation selon l'invention consiste par exemple à déplacer à l'aide de champs électromagnétiques appropriés cet atome (rsp. ion) hors de cette cavité afin qu'il puisse se désexciter spontanément. Plus efficacement, on peut par exemple amener l'atome (rsp. ion) dans une seconde cavité 25 présentant un mode d'absorption à la fréquence du Qubit.

Ainsi, dans ce cas, les premiers moyens du dispositif selon l'invention incluent des moyens aptes à faire varier la probabilité que l'atome ou l'ion absorbe de l'énergie, et de façon plus particulière, ces moyens modifient les dimensions de l'espace dans lequel l'atome ou l'ion 30 est confiné. Les deuxièmes moyens du dispositif selon l'invention sont alors constitués par le nouvel espace dissipatif dans lequel l'atome ou l'ion

est amené.

Selon une troisième technologie, les Qubits peuvent avoir pour support physique un point quantique réalisé dans un gaz bidimensionnel d'électrons, contrôlé par des électrodes de grille sur ou sous la surface de ce gaz.

Les deux états d'énergie correspondant aux deux états du Qubit sont généralement deux états électroniques du point quantique séparés par une énergie de transition  $\Delta E_{01}$ .

Dans cet exemple de dispositif de réinitialisation rapide selon l'invention les deuxièmes moyens comprennent un circuit électrique résonnant muni d'un composant résistif, placé dans le circuit d'au moins une électrode de grille, et les premiers moyens comprennent une source de champ magnétique ou des sources de tension de grille pour appliquer une valeur spécifique de la tension de grille aux électrodes de grille , afin de faire varier la taille du point quantique de manière à amener l'énergie de transition  $\Delta E_{01}$  à une valeur  $\Delta E'_{01}$  égale à ou proche de la valeur  $\Delta E_{env}$  d'un pic d'absorption du circuit électrique commandant au moins une des électrodes définissant la géométrie du point quantique.

## 20 Brève description des dessins

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront de la description suivante de modes particuliers de réalisation, donnés à titre d'exemples, en référence aux dessins annexés, sur lesquels :

- la Figure 1 représente le schéma de principe d'un Qubit électronique basé sur des jonctions Josephson, de type Quantronium,

- la Figure 2 est un diagramme en trois dimensions illustrant le choix du point de fonctionnement d'un dispositif de bit quantique selon l'invention,

- la Figure.3 représente des exemples de chronogrammes de signaux intervenant dans les manipulations ou la mesure d'états

quantiques d'un dispositif de bit quantique selon l'invention,

- la Figure 4A montre la représentation temporelle d'une impulsion de courant de lecture appliquée au Quantronium après que celui-ci a été préparé dans l'état  $|1\rangle$ , un plateau placé sur le front de montée de l'impulsion pour effectuer des tests pouvant être déplacé à différentes valeurs du courant dans la jonction de lecture, avec une durée ajustable,

5 - la Figure 4B montre la variation de la probabilité que le Quantronium soit mesuré dans l'état  $|1\rangle$ , en fonction du courant du plateau placé sur le front de montée de l'impulsion de lecture, avec une 10 durée du plateau qui est ici fixée à 100 ns.,

- la Figure 4C montre la variation de la probabilité que le Quantronium soit mesuré dans l'état  $|1\rangle$  en fonction de la durée du plateau, et ce pour deux valeurs du courant de plateau, induisant deux valeurs différentes de la fréquence de transition du Quantronium,

15 - la Figure 5 est une représentation schématique d'un exemple de circuit dont les moyens de réinitialisation sont constitués d'éléments de commandes spécifiques de l'impulsion de lecture,

20 - la Figure 6 est une représentation schématique d'un exemple de circuit dont les moyens de réinitialisation sont constitués d'éléments de commandes spécifiques de la phase  $\delta$  du Qubit à l'aide d'une boucle magnétique située à proximité,

- la Figure 7 est une représentation schématique d'un Qubit ionique, mettant en évidence le dispositif de communication avec une cavité électromagnétique et les moyens d'y déplacer l'ion, et

25 - la Figure 8 est une représentation schématique d'un Qubit à « point quantique » dans un gaz bidimensionnel, mettant en évidence un circuit électrique induisant à la fois une modification de sa taille (et donc de la fréquence de transition du Qubit) et une absorption de son énergie dans un mode de fréquence donné.

### Exposé détaillé de modes de réalisation particuliers de l'invention

On décrira d'abord la réalisation préférentielle d'un Qubit électrique, et plus particulièrement le cas où ce Qubit est un circuit électrique supraconducteur réalisé à l'aide d'une boîte à paires de Cooper à deux 5 jonctions Josephson, d'un circuit d'écriture comportant une électrode de grille, d'un circuit de lecture comprenant une jonction Josephson de lecture, d'énergie Josephson sensiblement supérieure à celle des jonctions Josephson de la boîte à paires de Cooper, et de moyens magnétiques aptes à ajuster la phase du Qubit, conformément à l'article 10 publié dans la revue Science 1069372 du 04 mai 2002 « Manipulating the Quantum State of an Electrical Circuit » de D. Vion, A. Aassime, A. Cottet, P. Joyez, H. Pothier, C. Urbina, D. Esteve, M. H. Devoret.

Un tel circuit, qui sera dans la suite dénommé Quantronium, est habituellement lu par l'application d'une impulsion de courant apte à faire 15 basculer la jonction Josephson de lecture.

En se référant à la figure 1, on peut encore définir un tel Quantronium par le fait que :

a) il comporte un îlot supraconducteur entre deux jonctions Josephson 101, 102 d'énergie Josephson  $E_{J1}$  et  $E_{J2}$  comparables, ces 20 jonctions étant comprises dans une boucle supraconductrice de type S, la boucle étant construite de telle manière que la fréquence de transition du Qubit puisse être ajustée électriquement à une valeur stationnaire des paramètres et perturbations extérieures,

b) il comporte une électrode 131 capacitivement liée à l'îlot supraconducteur, que la configuration du circuit rend apte à régler la fréquence de transition entre les deux états du Qubit, cette électrode étant par ailleurs apte, lors des phases d'écriture, à placer le Qubit dans une superposition cohérente des deux états du Qubit,

c) il comporte des moyens 133, 135 d'appliquer à la boucle 30 supraconductrice un flux magnétique  $\phi$ , que la configuration du circuit rend apte à régler la fréquence de transition  $\nu_{01}$  entre les deux états du Qubit,

d) il comporte une troisième jonction Josephson 105 dite de lecture, dont l'énergie Josephson  $E_{JL}$  vaut de l'ordre de 50 fois à 100 fois, et préférentiellement environ 80 fois, l'énergie Josephson  $E_{J1}$  ou  $E_{J2}$ , des jonctions Josephson 101, 102 définies ci-dessus, cette jonction Josephson 5 de lecture 105 fonctionnant alors comme un court-circuit supraconducteur lors des phases d'écriture ou de maintien, et fonctionnant comme un détecteur à seuil lors de la phase de lecture,

e) il comporte un circuit de lecture, indépendant du circuit d'écriture, galvaniquement connecté à la boucle supraconductrice du 10 Qubit, et comportant, outre la jonction Josephson de lecture 105, d'une part des moyens 125 pour appliquer pendant l'étape de lecture une impulsion de courant  $I_b$  de durée et d'amplitude ajustables, et d'autre part des moyens 126 de détection des sauts de phase aux bornes de la jonction Josephson de lecture 105 sous l'effet conjugué de l'état du Qubit 15 et de l'impulsion de lecture.

Pour ce Quantronium, la mise en œuvre préférentielle de l'invention comporte en plus des points a) à e), les points suivants qui apparaissent sur la figure 5 :

20 f) un dispositif dissipatif 21, ne présentant de la dissipation qu'à une ou quelques fréquences particulières, éloignées de la fréquence de transition nominale du Quantronium (typiquement de quelques GHz) ou de ses multiples ou sous multiples. Il est généralement réalisé par exemple à l'aide d'un circuit résonnant pourvu d'un élément résistif. Ce circuit 21, placé aux bornes de la jonction Josephson de lecture 105, est représenté schématiquement sur les figures 5 et 6 par un circuit RLC comportant une résistance 157, dont la valeur n'est pas une imperfection de construction 25 mais choisie volontairement à une valeur capable de dissiper l'énergie du Quantronium, un condensateur 159 et une inductance 158.

30 g) des moyens de couplage 31 appliquant, au moyen de commande habituel que constitue le circuit de lecture, une impulsion de courant de

valeur spécifique de manière à modifier l'énergie de transition du Qubit  $\Delta E_{01} = E_1 - E_0$ , pour l'amener, à une valeur  $\Delta E'_{01} \approx \Delta E_{\text{env.}}$ , cette dernière valeur correspondant à la fréquence de résonance du circuit résonnant 21 pourvu d'un élément résistif.

5 Par ailleurs, l'ensemble du circuit électrique d'un Quantronium est conçu de telle manière que sa structure et son fonctionnement soient les plus symétriques possibles. De plus, le Qubit est apte à être placé dans des conditions de fonctionnement qui favorisent le maintien de sa cohérence.

10 Ces conditions de fonctionnement qui favorisent le maintien de la cohérence du Qubit objet de l'invention sont :

15 1) préalablement à son utilisation et durant la manipulation de l'état quantique, l'ajustement électrique de la fréquence de transition des deux états quantiques à une valeur stationnaire vis-à-vis de la tension continue  $V_g$  appliquée au condensateur 103 de capacité  $C_g$  sur l'électrode 131 n'appartenant pas à l'îlot de charges, et vis-à-vis du flux magnétique traversant le Qubit,

20 2) lors des phases d'écriture (manipulation de l'état quantique), l'annulation de l'ensemble des courants circulant dans la boucle du Qubit proprement dit, ceci par une combinaison particulière d'un flux magnétique et d'un courant dans la jonction de lecture 105,

25 3) le circuit de lecture n'est pas activé en permanence mais seulement à certains instants déterminés par des impulsions de lecture  $I_b$ . L'îlot de charge peut, à travers le condensateur 103 de capacité  $C_g$  qui lui est connecté, être polarisé en charge.

Ceci s'effectue en appliquant à l'électrode 131 du condensateur 103 n'appartenant pas à l'îlot, une superposition :

- d'une tension continue de polarisation  $V_g$  qui en pratique détermine la fréquence de résonance de la boucle que constitue le Qubit.
- 30 - d'une séquence d'oscillations de tension  $u(t)$  à cette fréquence

de résonance, leur amplitude et leur nombre permettant de placer le Qubit dans une superposition cohérente à  $|0\rangle + b|1\rangle$  de ses deux états quantiques.

Les jonctions Josephson 101, 102 délimitant l'îlot de charges sont 5 choisies de manière telle que leur énergie Josephson  $E_J$  soit proche de leur énergie de Coulomb  $E_C$ . Chacune d'elles a une électrode qui fait partie de l'îlot supraconducteur, et une électrode qui n'en fait pas partie. Entre les électrodes de chacune de ces jonctions qui n'appartiennent pas à l'îlot, la différence de phase  $\delta$  imposée par l'impulsion de courant de 10 lecture fait circuler dans la boucle du Qubit des courants qui dépendent de son état.

Ces deux jonctions Josephson 101, 102 sont choisies de telle manière que leur énergie  $E_J$  soit très proche de leur énergie  $E_C$ , ce qui est généralement réalisé pour des jonctions de très petites dimensions. En 15 outre, les énergies Josephson  $E_J$  des jonctions 101, 102 présentent des valeurs les plus proches possibles. Les électrodes des jonctions Josephson n'appartenant pas à l'îlot se rejoignent pour former une boucle supraconductrice, l'ensemble formant le Qubit proprement dit. En réalité, cette boucle comporte aussi la troisième jonction Josephson 105, mais de 20 dimensions beaucoup plus grandes de sorte que pour cette dernière, l'énergie Josephson  $E_J$  est très grande devant l'énergie de Coulomb  $E_C$ .

C'est cette caractéristique qui permet à la jonction de lecture de se comporter, en dehors des périodes de lecture, comme un court circuit supraconducteur.

25 Dans son fonctionnement nominal, correspondant à un maintien maximal de la cohérence, un Quantronium est réglé comme suit :

Le fonctionnement d'un exemple de dispositif selon l'invention sera explicité à l'aide du schéma de principe de la Figure 1.

30 L'îlot de charges est délimité par les isolants des jonctions Josephson 101 et 102. Ces jonctions 101 et 102 ont des caractéristiques très proches. Elles sont de très petites dimensions (environ 0,1 μm sur 0,1

$\mu\text{m}$ ) et conçues pour que le rapport  $E_j/E_c$  de chacune soit compris entre 1 et 3. La valeur de ce rapport  $E_j/E_c$  pour la jonction effective de la boîte à paires de Cooper 110, quatre fois plus élevée, est donc comprise entre et 4 et 12.

5 La boucle supraconductrice se referme par une jonction de lecture 105 de dimensions très supérieures (environ 3  $\mu\text{m}$  sur 0,3  $\mu\text{m}$ ), se comportant quasiment comme un court-circuit pour le Qubit en dehors des étapes de mesure. Ceci en raison de son énergie Josephson  $E_{JL}$  environ 100 fois supérieure à l'énergie Josephson des jonctions 101 et 102. Par 10 ailleurs, le rapport  $E_j/E_c$  de cette jonction de lecture 105 est environ 5000 à 10000 fois plus élevé que le rapport  $E_j/E_c$  des jonctions 101 et 102.

15 Cette boucle est soumise à un flux magnétique  $\phi$  ajustable induit soit par un aimant permanent, soit par une bobine 133 ou un fil électrique parcourus par un courant issu d'une source de courant 135, placés à proximité, éventuellement sur le même substrat que le qubit. Ce flux  $\phi$  permet de régler la coordonnée  $\delta$  du point de fonctionnement pendant la manipulation du qubit. En particulier, il permet de compenser un courant de repos négatif dans la jonction de lecture 105 en maintenant la phase  $\delta$  à la valeur préférentielle.

20 Cette combinaison de flux magnétique à travers la boucle et de courant de repos négatif dans la jonction de mesure 105 permet d'augmenter le pouvoir de discrimination des états 0 et 1 lors de la lecture, comme cela sera indiqué plus loin.

25 Le circuit est réalisable avec tout matériau supraconducteur de type S comme par exemple l'aluminium ou le niobium. La réalisation préférentielle a été effectuée sur un substrat Si/SiO<sub>2</sub> par dépôt sous vide de films conducteurs en aluminium.

30 Les jonctions Josephson 101 et 102 sont réalisées par deux rubans d'aluminium déposés suivant un même axe, mais séparés de quelques centaines de nanomètres. Ces rubans sont oxydés en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Puis un

troisième ruban de faible longueur est déposé au niveau de la séparation entre les deux premiers rubans de telle sorte que ce ruban recouvre les deux premiers sur deux aires d'environ  $0,1\mu\text{m} \times 0,1 \mu\text{m}$  chacune, constituant de ce fait les deux jonctions Josephson 101, 102. Ce troisième ruban constitue l'îlot de la boîte à paires de Cooper, et donc aussi la première armature 131 du condensateur 103 de capacité  $C_g$ . Parallèlement à ce nouveau ruban, un autre ruban est réalisé, qui constituera la seconde armature du condensateur 103.

L'îlot de charges ainsi formé est de faibles dimensions.

Le reste de la boucle du qubit proprement dit est réalisé de manière analogue, mais les dimensions de la jonction Josephson de lecture 105 sont bien plus importantes, environ  $1 \mu\text{m}^2$ .

La température de fonctionnement du circuit doit être largement inférieure à l'énergie de transition du Qubit divisée par la constante de Boltzmann  $k_B$ . Elle est en pratique de l'ordre de 50 mK, et est obtenue avec un réfrigérateur à dilution He<sub>3</sub>/He<sub>4</sub>.

La fréquence de transition du Qubit dépend des paramètres extérieurs que sont la charge couplée à l'îlot et le flux magnétique à travers la boucle. Un bruit en charge électrique ou en flux magnétique est donc susceptible de faire varier cette fréquence de transition durant la manipulation du Qubit, et donc d'induire un déphasage aléatoire responsable de la décohérence de son état quantique. La sensibilité à ces bruits est donc minimale aux points de fonctionnement  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  où la fréquence de transition  $v_{01}$  est stationnaire vis-à-vis des paramètres extérieurs. Ces points de fonctionnement sont donc préférentiels. Pour un Qubit selon l'invention les points possibles sont le point selle noté  $F_1$  sur la Figure 2 ( $N_g=0.5$  et  $\delta=0$ ) ainsi que le point sommet  $F_2$  ou  $F_3$  à  $2\pi$  près ( $N_g=0$  ou  $1$  et  $\delta=0$ ) du graphe tridimensionnel.

Dans le fonctionnement nominal, correspondant à un maintien maximal de la cohérence, l'inscription d'un état ou d'une superposition cohérente d'états dans un Quantronium est effectuée comme suit :

Les phases d'inscription du Quantronium se situent dans le cadre des conditions générales de fonctionnement qui correspondent à un maintien maximal de la cohérence, à savoir :

1) préalablement à son utilisation et durant la manipulation de 5 l'état quantique, l'ajustement électrique de la fréquence de transition des deux états quantiques à une valeur stationnaire vis-à-vis de la tension continue  $V_g$  appliquée au condensateur 103 de capacité  $C_g$  sur l'électrode 131 n'appartenant pas à l'îlot de charges, et vis-à-vis du flux magnétique traversant le qubit,

10 2) lors des phases d'écriture (manipulation de l'état quantique), l'annulation de l'ensemble des courants circulant dans la boucle du qubit proprement dit, ceci par une combinaison particulière d'un flux magnétique et d'un courant dans la jonction de lecture 105.

L'écriture s'effectue d'une part en agissant sur le degré de liberté de 15 charge en appliquant à l'électrode de grille 131 de la boîte 110 (couplage par le condensateur 103 de capacité  $C_g$ ) une tension continue  $V_g$  à partir d'une source de tension 121 pour atteindre le point de fonctionnement optimal  $N_g=1/2$ , où  $N_g$  représente la charge de polarisation réduite de l'îlot  $C_g V_g / 2e$  et d'autre part, à partir d'une source 122, des impulsions 20 radiofréquence  $u(t)$  à la résonance avec le Qubit de la boîte 110. L'amplitude de la tension alternative  $u(t)$  correspond à une charge couplée de l'ordre de 0,01 fois  $2e$ .

Lors des phases de lecture, un Quantronium procède comme suit :

Pour la lecture de l'état du qubit, un générateur de courant 125 en 25 parallèle avec la jonction Josephson de lecture 105 génère une impulsion  $I_b$  (Figure 3) d'intensité et de durée ajustables (typiquement 100 ns). Lors d'une impulsion, ce générateur de courant 125 induit aux bornes de la jonction Josephson de lecture 105 une différence de phase supraconductrice qui, avec la différence de phases supraconductrices  $\delta$  aux 30 bornes de la boîte à paires de Cooper 100 et avec le flux magnétique  $\phi$  traversant la boucle, vérifie l'équation suivante :

$$\delta = \gamma + \phi/\phi_0 \quad 2\pi \text{ au signe près}$$

où  $\phi_0$  est le quantum de flux magnétique.

Au point de fonctionnement  $F_1$  ( $N_g = 0$   $\delta = 0$ ) pendant le temps de l'impulsion de lecture, la phase  $\gamma$  subit un déplacement qui engendre un 5 déplacement de la phase  $\delta$ . La jonction de lecture 105 commute autour de  $\gamma = \pi/2$ .

Durant la lecture, le courant doit être proche du courant critique de la jonction de lecture 105 de façon à avoir des taux de transition respectivement proches de 0% et de 100% pour les deux états du qubit. 10 Le courant de polarisation  $I_b$  en dehors de la lecture est choisi pour maintenir le circuit au point F choisi tels que les points  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  de la Figure 2. Enfin, le choix du flux  $\phi$  couplé à la boucle supraconductrice peut être optimisé pour que les courants de boucle  $i_0$  et  $i_1$  associés aux états  $|0\rangle$  et  $|1\rangle$ , révélés par l'impulsion de lecture, soient les plus différents 15 possibles.

Une optimisation de la lecture de l'état du Qubit selon l'invention est réalisée en choisissant le flux magnétique  $\phi$  induit au travers de la boucle supraconductrice pour que les courants de boucle  $i_0$  et  $i_1$  associés aux états  $|0\rangle$  et  $|1\rangle$ , révélés par l'impulsion de lecture, soient les plus différents possibles. Pour compenser ce flux magnétique et maintenir une 20 phase  $\delta$  nulle correspondant au point de fonctionnement  $F_i$ , le générateur de courant de lecture délivre en dehors des séquences de lecture, non pas un courant de repos nul, mais un courant de repos de l'ordre de -0,25  $I_{bc}$ , négatif par rapport au sens des impulsions de lecture. La valeur de 25 crête  $I_{bc}$  de ces impulsions reste inchangée. Selon cette optimisation préférentielle, le déplacement en phase  $\delta$  au cours de l'impulsion de lecture sera compris entre  $\pi/2$  et  $\pi$ .

Dans le fonctionnement nominal de ce Qubit, correspondant à un 30 maintien maximal de la cohérence, le découplage du Qubit de la jonction de lecture est obtenu comme suit :

La boucle de lecture a des modes propres dont la fréquence doit être la plus éloignée possible de la fréquence propre de la boucle du Qubit proprement dit afin d'éviter la relaxation du Qubit vers son état fondamental  $|0\rangle$ .

5 Cette séparation entre les fréquences propres du Qubit et de la jonction de lecture existe déjà du fait de la différence importante entre les dimensions et les caractéristiques de la jonction Josephson de lecture 105, et celles des jonctions Josephson 101, 102 délimitant l'îlot. Elle est volontairement augmentée par l'ajout d'un ou plusieurs condensateurs aux 10 bornes de la jonction Josephson de lecture 105.

En résumé, l'aptitude d'un Quantronium à évoluer de manière cohérente est obtenue par le respect de trois conditions :

15 a) la première condition vise à supprimer l'effet du bruit en charge vu par l'îlot. Contrairement à la boîte de Cooper mesurée en charge, il est possible selon l'invention de choisir le rapport entre les paramètres énergie Josephson  $E_j$  et énergie de Coulomb  $E_c$  de façon à pouvoir simultanément :

- assurer l'anharmonicité du spectre des énergies pour former effectivement un Qubit,

20 - rendre la fréquence de transition quasi-complètement insensible au bruit en charge,

- manipuler l'état du Qubit par application de tensions radiofréquence sur la grille 131 de l'îlot.

25 b) la seconde condition vise à limiter la relaxation du Qubit, qui contribue à la décohérence, lorsque ce dernier est placé dans son état excité conventionnellement noté  $|1\rangle$ . En effet, un Qubit peut se désexciter en transférant son énergie à son environnement immédiat, en l'occurrence ici dans l'ensemble du circuit électrique. Plus précisément, ce transfert s'effectue vers la partie réelle 157 de l'impédance électrique équivalente 30 157, 158 telle qu'elle est vue du Qubit (Figures 5 et 6). Cette impédance,

même minimisée, ne peut être rigoureusement nulle. Pour que le transfert d'énergie soit nul, il faut donc imposer comme condition qu'aucun courant ne circule dans la boucle supraconductrice du Qubit. Cette condition d'annuler le courant global de la boucle du Qubit, résultant de l'état du

5 Qubit ou de la superposition cohérente de ses états, est obtenue en réglant précisément le flux magnétique à une valeur nulle au moyen d'un flux antagoniste appliqué à la boucle du Qubit par un champ  $B$  appliqué soit par un aimant permanent adéquat soit par une boucle d'induction parcourue par un courant de commande. Cette condition doit être vérifiée

10 pendant les phases d'écriture et de maintien, quel que soit l'état du Qubit et donc quel que soit le flux à annuler.

c) la troisième condition vise à limiter l'influence des paramètres d'environnement sur la décohérence. Si on note par  $|\Psi(t=0)\rangle$  l'état superposé suivant :

15  $|\Psi(t=0)\rangle = |0\rangle + |1\rangle$

Idéalement, cet état évolue librement par déphasage relatif des composantes  $|0\rangle$  et  $|1\rangle$  à la fréquence de transition  $\nu_{01}$  du Qubit :

$$|\Psi(t)\rangle = |0\rangle + \exp(i\nu_{01}t) |1\rangle$$

20 Si la fréquence de transition  $\nu_{01}$  dépend de paramètres extérieurs que l'on représente par la variable générique  $x$ , tout bruit sur cette variable générique  $x$  se traduit par une fluctuation de la fréquence de transition  $\nu_{01}$  et donc par une erreur aléatoire sur le déphasage relatif des composantes  $|0\rangle$  et  $|1\rangle$  : C'est le phénomène de décohérence. La décohérence est donc minimale quand la fréquence de transition  $\nu_{01}$  est stationnaire vis-à-vis de  $x$ , c'est-à-dire quand est remplie la condition :

$$d\nu_{01} / dx = 0$$

30 Pour l'invention, les paramètres extérieurs dont dépend la fréquence de transition  $\nu_{01}$ , et qui ont été symbolisés par la variable générique  $x$ , sont essentiellement au nombre de deux : la tension continue  $V_g$  appliquée au condensateur 103 et le flux magnétique  $\phi$  à travers la

boucle supraconductrice constituant le Qubit proprement dit. Les valeurs de  $V_g$  et  $\phi$  sont donc ajustées de telle sorte que soient remplies simultanément les deux conditions :

$$\frac{dv_{01}}{dV_g} = 0$$

5  $\frac{dv_{01}}{d\phi} = 0$

ce qui minimise la décohérence, notamment dans le cas d'un état superposé du Qubit.

On décrira maintenant la mise en œuvre du dispositif de réinitialisation

10 selon l'invention dans le cadre d'une association avec un Quantronium.

L'invention consiste à générer une excursion transitoire de l'une au moins des trois conditions mentionnées ci-dessus hors des conditions fonctionnelles, pour placer au contraire le Qubit dans des conditions induisant un échange d'énergie au voisinage de la fréquence propre de ce Qubit, afin d'obtenir rapidement une décohérence par relaxation. Ces conditions correspondent électriquement à un envoi d'énergie dans des résonances de degrés de liberté secondaires du circuit, puis à une dissipation de cette énergie par voie résistive.

15 Le dispositif dissipatif résonnant est placé aux bornes de la jonction Josephson de lecture. Il est représenté schématiquement sur la figure 5

par un circuit RLC comportant une résistance 157 volontairement dissipative, un condensateur 159 et une self 158. Il peut tout aussi bien être représenté d'une manière équivalente par une self, un condensateur et une résistance en parallèle, car en réalité aux fréquences considérées

25 les constantes sont réparties. Un élément quelconque de circuit imprimé comporte simultanément des caractéristiques selfiques, et capacitatives quasiment impossibles à localiser physiquement, comme cela est bien connu en hyperfréquences. En outre ces caractéristiques dépendent aussi de son environnement immédiat, au point que sa géométrie, même

30 donnée avec précision, ne suffit pas à déterminer ses caractéristiques réparties. On se contentera de définir sa fréquence de résonance

correspondant, comme vu précédemment, à un degré de liberté particulier  $\Delta E_{env}$  pouvant absorber l'énergie de transition  $\Delta E_{01} = E_1 - E_0$  du Qubit lorsque celle-ci est amenée à la valeur  $\Delta E'_{01} \approx \Delta E_{env}$ . Dans le cas particulier considéré, cette fréquence se situe autour de 8,06 GHz.

5 Les moyens de couplage temporaire au Qubit pour sa réinitialisation peuvent présenter plusieurs variantes.

10 Selon la variante préférentielle, on applique, au moyen de commande habituel que constitue le circuit de lecture, une impulsion de courant de valeur spécifique de l'ordre de  $-130 \text{ nA}$  de manière à diminuer le temps de relaxation  $T_1$  à 59 ns, et porter au bout de ce temps la probabilité de lire l'information initiale à environ 32%, soit pour un temps de réinitialisation de plusieurs fois  $T_1$  une valeur très proche de zéro.

15 Une seconde variante préférentielle consiste à utiliser un second générateur de courant 155 (module 31) aux bornes de la jonction Josephson de lecture, spécifique au dispositif de réinitialisation selon l'invention, conformément au schéma de la Figure 5.

20 L'équivalence de ces deux variantes va de soi pour un électronicien, il est équivalent d'ajouter un second générateur de courant ou d'utiliser le même générateur de courant doté d'une entrée de commande, spécifique ou non, apte à recevoir des impulsions de réinitialisation. Pour la clarté du schéma, on a représenté schématiquement ces moyens de couplage par des moyens additionnels 155 pour appliquer pendant l'étape de réinitialisation une impulsion de courant  $I_b$  (figures 5 et 6).

25 Le fonctionnement de l'invention sera expliqué à l'aide des figures 4A à 4C.

30 La figure 4A représente, en fonction du temps, l'amplitude d'une impulsion  $I_b$  de courant de lecture appliquée au Quantronium aux bornes de la jonction Josephson de lecture 105 par le générateur de courant 125. Cette impulsion part d'une valeur de repos de l'ordre de  $-300 \text{ nA}$  favorable au maintien de la cohérence. Au préalable, ce Quantronium a été préparé

dans l'état  $|1\rangle$  à un instant repéré par le pic vertical descendant en pointillés, marqué «  $\mu$ w pulse ». A une valeur arbitrairement représentée à -130 nA, on a représenté une stabilisation du courant dénommée plateau de courant. Puis l'impulsion de lecture se poursuit jusqu'à une valeur de 5 l'ordre de 400 nA; un plateau a été placé sur le front de montée de l'impulsion pour tester l'invention. De nombreuses valeurs ont été testées pour l'amplitude de ce plateau, ainsi que pour sa durée.

La figure 4B montre, pour toutes les valeurs de ce plateau de courant noté  $I_{\text{Plateau}}$  la probabilité qu'il y a de lire l'état  $|1\rangle$  préparé dans le 10 bit quantique à l'instant du «  $\mu$ w pulse ». Toutes ces mesures ont été faites avec une durée de 100 ns du plateau de courant  $I_{\text{Plateau}}$ . On remarque sur cette figure de fortes variations de cette probabilité. Plus 15 cette probabilité est élevée, comme pour la première flèche, verticale ascendante, à l'abscisse -320 nA, plus l'information lue se rapproche de l'information inscrite : la cohérence est bonne et le temps  $T_1$  de relaxation vaut 730 ns. Plus cette probabilité est faible, comme pour la seconde flèche, verticale descendante, à l'abscisse -130 nA, plus l'information lue 20 s'éloigne de l'information inscrite associée à l'état  $|1\rangle$  : le bit quantique perd facilement sa cohérence, par relaxation, et le temps  $T_1$  de relaxation chute à 59 ns.

Pour les deux valeurs de courant de plateau -320 nA et -130 nA, la 25 figure 4C montre la variation de la probabilité que le Quantronium soit mesuré dans l'état  $|1\rangle$  en fonction de la durée du plateau. Or nous avons vu qu'une impulsion de lecture induit aux bornes de la jonction Josephson de lecture 105 une différence de phase supraconductrice qui, avec la différence de phases supraconductrices  $\delta$  aux bornes de la boîte de Cooper 110 et avec le flux magnétique  $\phi$  traversant la boucle, vérifie l'équation suivante :

$$\delta = \gamma + \phi/\phi_0 \cdot 2\pi \quad \text{au signe près}$$

30 où  $\phi_0$  est le quantum de flux magnétique.

Au point de fonctionnement, par exemple selon la figure 2 le point  $F_1$  ( $N_g = 0$   $\delta = 0$ ) pendant le temps de cette impulsion de lecture, la phase  $\gamma$  subit un déplacement qui engendre un déplacement de la phase  $\delta$ . Pendant la durée du palier, le point de fonctionnement se déplace sur la courbe de la figure 2 en suivant un plan défini par  $N_g$  constant. Ainsi par exemple le point  $F_1$  devient-il  $F'_1$ , pendant la durée du plateau de courant  $I_{Plateau}$ . La fréquence de transition du bit quantique qui était  $\Delta E_{01} = E_1 - E_0$  au point de fonctionnement  $F_1$ , devient  $\Delta E'_{01} = E'_1 - E'_0$  au point de fonctionnement  $F'_1$ . Il suffit alors de choisir la fréquence du circuit résonnant pour que  $\Delta E_{env.} \approx \Delta E'_{01}$ .

Cette valeur du courant  $I_{Plateau}$  peut en pratique être obtenue indifféremment avec des consignes spécifiques appliquées au générateur de courant 125 conçu pour l'impulsion de lecture, ou par un second générateur de courant  $I_b$  155 connecté en parallèle à cet effet. A titre indicatif, avec un courant de -130 nA, et une fréquence de résonance du circuit dissipatif de l'ordre de 8,06 GHz, on obtient un temps de relaxation  $T_1$  inférieur à 60 ns, et une probabilité de relaxation atteignant 97% au bout de 200 ns.

Il va de soi que plus le dispositif quantique considéré est apte à maintenir longtemps sa cohérence, plus le dispositif de relaxation selon l'invention est avantageux.

La figure 6 montre une variante de réalisation dans laquelle les moyens de couplage ou premiers moyens comprennent un module 32 avec une bobine magnétique 140 placée au voisinage du Qubit et agissant sur sa phase  $\delta$ , et un générateur 145 d'impulsions de courant d'amplitude adéquate pour amener temporairement l'énergie de transition  $\Delta E_{01}$  à une valeur  $\Delta E'_{01}$  égale à ou proche de la valeur  $\Delta E_{env}$  du pic d'absorption.

On procèdera maintenant, en référence à la figure 7, à la description d'une réalisation préférentielle de l'invention mettant en œuvre un Qubit ionique.

L'état énergétique de l'atome ou de l'ion 1 change sous l'effet de l'absorption ou de l'émission d'un photon de fréquence  $\nu_{01}$  correspondant à l'énergie de transition du Qubit. La condition que l'on recherche pour écrire une information dans le Qubit ou le laisser évoluer de manière cohérente consiste à le placer dans une cavité électromagnétique 2 suffisamment petite pour qu'elle ne puisse absorber aucun photon à la fréquence  $\nu_{01}$ .

Selon l'invention, le dispositif dissipatif correspond à un environnement dans lequel peut se produire une émission de photon par l'atome ou l'ion (cavité 4). Le dispositif de commande consiste soit en moyens aptes à faire varier le rapport entre la fréquence de transition et les dimensions de l'espace dans lequel cet atome ou cet ion 1 est confiné (comme par exemple un ensemble de faisceaux laser, ou des moyens générant un champ magnétique approprié), soit en un dispositif à laser ou électromagnétique le déplaçant d'une cavité 2 où il est confiné dans une cavité 4 significativement plus grande (voire une absence de cavité) pour qu'il puisse se désexciter spontanément.

Ainsi, dans le cas d'un atome ou ion 1 réalisant un Qubit à deux niveaux d'énergie, le Qubit est soit piégé à l'aide de champs électromagnétiques, soit libre de se déplacer du fait de sa vitesse propre.

La cavité électromagnétique 2 a une absorption très faible et donc un facteur de qualité élevé. Selon les cas, cette cavité peut avoir :

une fréquence propre égale à ou proche de la fréquence de transition du Qubit si elle est utilisée pour un contrôle cohérent de ce Qubit, ou pour médier une interaction avec un autre Qubit pouvant entrer dans la cavité ultérieurement ;

une fréquence propre fondamentale sensiblement plus élevée que la fréquence de transition du Qubit, afin d'éviter tout échange d'énergie entre la cavité et le Qubit.

Pour la réinitialisation rapide, l'atome ou l'ion 1 est déplacé (référence 3) soit sous l'effet de sa vitesse initiale propre, soit par

application d'un champ électromagnétique locomoteur, appliqué par des moyens non représentés sur le dessin, vers la zone où ce Qubit pourra relaxer rapidement dans son état fondamental.

Dans le cas où l'atome ou l'ion se déplace sous l'effet de sa vitesse 5 initiale, les premiers moyens du dispositif selon l'invention qui définissent un dispositif de couplage comprennent simplement des moyens de suppression temporaire des moyens qui maintiennent cet atome ou cet ion dans la cavité à très faible absorption. Dans le cas où cet atome ou cet ion est déplacé par des moyens électromagnétiques, ces moyens constituent 10 les premiers moyens du dispositif selon l'invention.

La zone de relaxation rapide du Qubit peut être l'intérieur d'une autre cavité électromagnétique 4 de facteur de qualité faible (forte absorption), qui définit les deuxièmes moyens à caractère dissipatif du dispositif selon l'invention. L'une des fréquences propres de la cavité 4 15 doit être égale à ou proche de la fréquence du Qubit pour que la relaxation du Qubit ait lieu rapidement.

La fréquence de transition du Qubit peut être amenée à une valeur égale ou proche du mode résonnant de faible facteur de qualité choisi pour la réinitialisation, à l'aide de champs électromagnétiques appropriés. 20 Sur la figure 7, on a représenté à titre d'exemple des bobines de Helmholtz 5 alimentées par une source de courant 6 et aptes à faire varier temporairement la fréquence de transition du Qubit par effet Zeeman.

On procèdera maintenant en référence à la figure 8 à la description 25 d'une réalisation préférentielle avec un point quantique réalisé dans un gaz bidimensionnel d'électrons.

Selon une technologie particulière, les Qubits peuvent avoir pour support physique un point quantique réalisé dans un gaz bidimensionnel d'électrons, contrôlé par des électrodes de grille 12, 13 sur ou sous la surface de ce gaz. Les deux états d'énergie correspondant aux deux états 30 du Qubit sont généralement deux états électroniques du point quantique séparés par une énergie de transition  $\Delta E_{01}$ , commandés par la tension des

électrodes de grille 12, 13 : une tension négative d'amplitude plus forte confine davantage le point quantique, et augmente l'écart entre les niveaux d'énergie, donc entre les états  $E_0$  et  $E_1$ , donc augmente l'énergie de transition  $\Delta E_{01}$ . Généralement ces électrodes de grille 12, 13 sont soumises à la même tension de polarisation.

Selon l'invention, le dispositif dissipatif correspond à un circuit électrique résonnant 16 muni d'un composant résistif 161, placé dans le circuit d'au moins une électrode de grille 13. Le dispositif de commande consiste par exemple en une source de champ magnétique ou une valeur spécifique de la tension de grille appliquée aux électrodes, capable d'amener l'énergie de transition  $\Delta E_{01}$  à une valeur égale à ou proche de celle d'un pic d'absorption du circuit électrique commandant au moins une des électrodes 12, 13 définissant la géométrie du point quantique, ce qui revient à dire, afin d'amener l'énergie de transition  $\Delta E_{01}$  à une valeur  $\Delta E'_{01}$

10  $\approx \Delta E_{\text{env.}}$

Si l'on considère la figure 8, on voit donc que le point quantique 11 est délimité par des tensions appliquées par des électrodes de grille 12, 13, elles-mêmes alimentées par des sources de tension de grille ajustables 14, 15. Les électrodes de grille 12 servent à définir la région de l'espace où se situe le point quantique 11. L'électrode de grille 13 peut être du même type que les électrodes de grille 12, mais peut éventuellement être dédiée à la réinitialisation du Qubit.

20 Une impulsion de tension peut être appliquée temporairement à l'électrode 13 par la source de tension 15 pour modifier la taille du point quantique 11 et amener la fréquence de transition du Qubit à une valeur égale à ou proche de celle d'une résonance de l'environnement extérieur.

25 Le circuit 17 comportant une source de courant 171 et une bobine 172 sert à générer un champ magnétique dans la région du point quantique. Ce circuit peut être utilisé pour appliquer une impulsion de champ magnétique de façon à amener la fréquence de transition du Qubit à une valeur égale à ou proche de celle d'une résonance de

l'environnement extérieur.

Le circuit résonnant 16 comprend une résistance 161, une inductance 162 et un condensateur 163 montés en parallèle et est interposé entre la source de tension 15 et l'électrode de grille 13. Le mode 5 résonnant du circuit de commande de la grille 13 est capable d'absorber l'énergie du Qubit lorsque l'énergie de transition de ce dernier coïncide avec le mode résonnant. Ce mode pourrait également se trouver dans l'un des circuits des électrodes de grille 12 ou même dans le circuit 17.

## Revendications

1- Dispositif de réinitialisation d'un dispositif de bit quantique  
5 présentant deux états  $|0\rangle$  et  $|1\rangle$  associés respectivement à deux niveaux d'énergie  $E_0$  et  $E_1$  tels que  $E_0 < E_1$ , pour réinitialiser ce dispositif de bit quantique à l'état  $|0\rangle$ , caractérisé en ce qu'il comprend des premiers moyens aptes à générer une augmentation temporaire de la probabilité du dispositif de bit quantique de relaxer de l'état  $|1\rangle$  vers l'état  $|0\rangle$  et des 10 deuxièmes moyens aptes à absorber l'énergie de transition  $\Delta E_{01} = E_1 - E_0$  cédée par le dispositif de bit quantique lors de sa relaxation de l'état  $|1\rangle$  vers l'état  $|0\rangle$ .

2- Dispositif de réinitialisation d'un dispositif de bit quantique selon  
15 la revendication 1, caractérisé en ce que les deuxièmes moyens sont placés dans l'environnement énergétique immédiat du dispositif de bit quantique et ont au moins un pic d'absorption dont la valeur  $\Delta E_{\text{env}}$  est :

- 20 ◦ suffisamment éloignée de l'énergie de transition  $\Delta E_{01} = E_1 - E_0$  du dispositif de bit quantique, pour rendre négligeable ou nulle toute interaction entre le dispositif de bit quantique et ces deuxièmes moyens, mais
- 25 ◦ suffisamment proche de cette énergie de transition pour que le dispositif de bit quantique puisse être placé dans des conditions de fonctionnement où l'énergie de transition  $\Delta E'_{01}$  devient égale à ou proche de la valeur  $\Delta E_{\text{env}}$  du pic d'absorption, de telle manière qu'il puisse exister temporairement un fort couplage d'énergie entre le dispositif de bit quantique et ces deuxièmes moyens,

et en ce que les premiers moyens sont aptes à modifier l'énergie de transition  $\Delta E_{01} = E_1 - E_0$  du dispositif de bit quantique, pour l'amener, lors des réinitialisations, à ladite valeur  $\Delta E'_{01}$  égale à ou proche de la valeur  $\Delta E_{env}$  du pic d'absorption.

5

3- Dispositif de réinitialisation d'un dispositif de bit quantique selon la revendication 2, caractérisé en ce que les deuxièmes moyens ayant au moins un pic d'absorption de valeur  $\Delta E_{env}$  présentent un degré de liberté particulier pouvant absorber l'énergie de transition  $\Delta E_{01} = E_1 - E_0$  du dispositif de bit quantique lorsque celle-ci est amenée à la valeur  $\Delta E'_{01}$  égale à ou proche de la valeur  $\Delta E_{env}$  du pic d'absorption.

10 4- Dispositif de réinitialisation d'un dispositif de bit quantique selon la revendication 2, caractérisé en ce que les deuxièmes moyens ayant au moins un pic d'absorption de valeur  $\Delta E_{env}$  présentent une collection de degrés de liberté dont la densité spectrale quantique à la fréquence de transition  $\nu_{01} = \Delta E_{01}/h$  (où  $h$  est la constante de Planck) du dispositif de bit quantique est grande.

15 5- Dispositif de réinitialisation d'un dispositif de bit quantique selon l'une quelconque des revendications 2 à 4, caractérisé en ce que les premiers moyens comprennent des moyens générant des consignes spécifiques de réinitialisation, ces consignes étant appliquées aux moyens habituels de réglage du dispositif de bit quantique, de manière à amener temporairement l'énergie de transition  $\Delta E_{01}$  à la valeur  $\Delta E'_{01}$  égale à ou proche de la valeur  $\Delta E_{env}$  du pic d'absorption.

20 6- Dispositif de réinitialisation d'un dispositif de bit quantique selon la revendication 5, caractérisé en ce que les consignes spécifiques de

réinitialisation ont une valeur choisie en dehors des plages utilisées lorsque le dispositif de bit quantique est laissé évoluer de manière cohérente.

5 7- Dispositif de réinitialisation d'un dispositif de bit quantique selon l'une quelconque des revendications 2 à 4, caractérisé en ce que les premiers moyens comprennent des moyens spécifiques de réglage des paramètres de fonctionnement du dispositif de bit quantique, agissant directement sur l'énergie de transition du dispositif de bit quantique pour amener temporairement l'énergie de transition  $\Delta E_{01}$  à une valeur  $\Delta E'_{01}$  égale à ou proche de la valeur  $\Delta E_{env}$  du pic d'absorption, indépendamment du réglage des paramètres de fonctionnement du dispositif de bit quantique tels que choisis pour le faire évoluer de manière cohérente.

10 15

8- Dispositif de réinitialisation d'un dispositif de bit quantique selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, caractérisé en ce que le dispositif de bit quantique comprend un support physique ayant un comportement quantique constitué par un dispositif électronique intégré supraconducteur à jonctions Josephson (101, 102) et boîte à paires de Cooper (110), pourvu d'une jonction Josephson de lecture (105) activée par une impulsion de courant.

20

9- Dispositif de réinitialisation d'un dispositif de bit quantique selon les revendications 5 et 8, caractérisé en ce que les premiers moyens comprennent des moyens générant des consignes spécifiques de réinitialisation sous forme d'une impulsion de courant, ces consignes étant appliquées à la Jonction Josephson de lecture (105), et en ce que l'amplitude de l'impulsion de courant est choisie pour maximiser la relaxation du dispositif de bit quantique.

30

10- Dispositif de réinitialisation d'un dispositif de bit quantique selon la revendication 9, caractérisé en ce que l'amplitude de l'impulsion de courant est choisie en dehors de la plage utilisée lors d'une opération de lecture.

11- Dispositif de réinitialisation d'un dispositif de bit quantique selon les revendications 5 et 8, caractérisé en ce qu'il comprend des moyens magnétiques de réglage agissant sur la phase  $\delta$  du dispositif de bit quantique qui comportent une bobine magnétique et un générateur d'impulsions de courant, et en ce que les premiers moyens comprennent des moyens générant des consignes spécifiques de réinitialisation sous forme d'une impulsion de courant de valeur spécifique appliquée à la bobine magnétique agissant sur cette phase  $\delta$  du dispositif de bit quantique.

12- Dispositif de réinitialisation d'un dispositif de bit quantique selon la revendication 11, caractérisé en ce que les premiers moyens comprennent une seconde bobine magnétique (140) placée au voisinage du dispositif de bit quantique et agissant sur sa phase  $\delta$ , et un générateur (145) d'impulsions de courant d'amplitude adéquate pour amener temporairement l'énergie de transition  $\Delta E01$  à une valeur  $\Delta E'01$  égale à ou proche de la valeur  $\Delta E_{env}$  du pic d'absorption.

13- Dispositif de réinitialisation d'un dispositif de bit quantique selon la revendication 11, caractérisé en ce que les premiers moyens comprennent une deuxième grille de couplage de la boîte à paires de Cooper et un générateur d'impulsions de tension, d'amplitude adéquate pour amener temporairement l'énergie de transition  $\Delta E01$  à une valeur  $\Delta E'01$  égale à ou proche de la valeur  $\Delta E_{env}$  du pic d'absorption.

14- Dispositif de réinitialisation d'un dispositif de bit quantique selon la revendication 11, caractérisé en ce que les premiers moyens comprennent une seconde boucle de circuit (31) passant par la jonction Josephson de lecture (105), et apte à envoyer dans cette jonction Josephson de lecture (105) une impulsion de courant d'une amplitude adéquate pour amener temporairement l'énergie de transition  $\Delta E01$  à une valeur  $\Delta E'01$  égale à ou proche de la valeur  $\Delta E_{env}$  du pic d'absorption.

10 15- Dispositif de réinitialisation d'un dispositif de bit quantique selon l'une quelconque des revendications 8 à 14, caractérisé en ce que les deuxièmes moyens comprennent un dispositif dissipatif (21) placé aux bornes de la jonction Josephson de lecture (105) et comportant une résistance dissipative (157), un condensateur (159) et une inductance 15 (158).

20 16- Dispositif de réinitialisation d'un dispositif de bit quantique selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, caractérisé en ce que le dispositif de bit quantique comprend un support physique (1) ayant un comportement quantique constitué par l'état énergétique d'un atome ou d'un ion.

25 17- Dispositif de réinitialisation d'un dispositif de bit quantique selon la revendication 16, caractérisé en ce que les premiers moyens comprennent des moyens aptes à faire varier la probabilité que l'atome ou l'ion émette de l'énergie.

30 18- Dispositif de réinitialisation d'un dispositif de bit quantique selon la revendication 16, caractérisé en ce que les moyens aptes à faire varier la probabilité que l'atome ou l'ion émette de l'énergie, modifient les

dimensions de l'espace dans lequel cet atome ou cet ion est confiné.

5 19- Dispositif de réinitialisation d'un dispositif de bit quantique selon la revendication 16, caractérisé en ce que les premiers moyens comprennent un dispositif déplaçant l'atome ou l'ion d'une cavité (2) où il est confiné dans une cavité (4) significativement plus grande.

10 20- Dispositif de réinitialisation d'un dispositif de bit quantique selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, caractérisé en ce que le dispositif de bit quantique comprend un support physique (11) ayant un comportement quantique constitué par un point quantique réalisé dans un gaz bidimensionnel d'électrons, contrôlé par des électrodes de grille (12, 13) sur ou sous la surface de ce gaz.

15 21- Dispositif de réinitialisation d'un dispositif de bit quantique selon les revendications 2 et 20, caractérisé en ce que les deuxièmes moyens comprennent un circuit électrique résonnant (16) muni d'un composant résistif (161), placé dans le circuit d'au moins une électrode de grille (13), et les premiers moyens comprennent une source de champ magnétique 20 (17) ou des sources de tension de grille (14, 15) pour appliquer une valeur spécifique de la tension de grille aux électrodes de grille (12, 13), afin de faire varier la taille du point quantique de manière à amener l'énergie de transition  $\Delta E_{01}$  à une valeur  $\Delta E'_{01}$  égale à ou proche de la valeur  $\Delta E_{env}$  d'un pic d'absorption du circuit électrique commandant au moins une des 25 électrodes (12, 13) définissant la géométrie du point quantique.

## Abrégé (fig 1)

5 Le dispositif de réinitialisation d'un dispositif de bit quantique ou Qubit présentant deux états  $|0\rangle$  et  $|1\rangle$  associés respectivement à deux niveaux d'énergie  $E_0$  et  $E_1$  tels que  $E_0 < E_1$ , est destiné à réinitialiser ce dispositif de bit quantique à l'état  $|0\rangle$  et comprend des premiers moyens (31, 32) aptes à générer une augmentation temporaire de la probabilité du 10 dispositif de bit quantique de relaxer de l'état  $|1\rangle$  vers l'état  $|0\rangle$  et des deuxièmes moyens (21) aptes à absorber l'énergie de transition  $\Delta E_{01} = E_1 - E_0$  cédée par le dispositif de bit quantique lors de sa relaxation de l'état  $|1\rangle$  vers l'état  $|0\rangle$ .

15 Le dispositif est applicable à des Qubits présentant différents supports physiques.